

# 基于分水岭算法的电感激光热成像图像分割

张亦舒, 王晓娜, 侯德鑫, 叶树亮

(中国计量大学 工业与商贸计量技术研究所, 浙江 杭州 310018)

**摘要:** 激光热成像是一种检测电感微裂纹的新方法, 但批量自动检测时电感彼此靠近易导致定位错误和误检。根据激光扫描和热成像检测过程分析图像特征, 提出求取温度梯度图并利用次大值滤波消除其激励非均匀性, 采用形态学操作断开样品粘连处并去除干扰噪声点; 通过距离变换结合分水岭算法得到电感图像分割结果。实验结果表明: 该方法实现了对批量铁氧体电感图像的自动分割提取, 为后续铁氧体电感试样的分选打下良好基础。

**关键词:** 激光热成像; 正交扫描; 铁氧体电感; 图像分割; 距离变换; 分水岭算法

**中图分类号:** TN219      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-8891(2021)04-0367-05

## Image Segmentation of Inductors Laser Thermal Imaging Based on Watershed Algorithm

ZHANG Yishu, WANG Xiaona, HOU Dexin, YE Shuliang

(Institute of Industry and Trade Measurement Technique, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** Laser thermography is a new method to detect micro cracks in inductors, but the proximity of inductors in batch automatic detection made it easy to cause positioning errors and false detection results. According to the analysis of image features in the process of laser scanning and thermal imaging detection, a new method was proposed to obtain the temperature gradient map and eliminate its excitation nonuniformity by using the sub maximum filter, and to disconnect the adhesion of samples and remove the interference noise points by using morphological operation. The inductance images were segmented combining distance transformation with watershed algorithm. The experimental results show that the method realizes the automatic separation and extraction of ferrite inductor from image, which lays a good foundation for the separation of ferrite inductors.

**Key words:** laser thermography, orthogonal scanning, ferrite inductor, image segmentation, distance transformation, watershed algorithm

## 0 引言

铁氧体为脆性材料, 在生产铁氧体电感过程中其表面易产生细小裂纹, 需要对其进行质检并分选。材料表面的裂纹及早检出, 可以有效避免重大的经济损失<sup>[1]</sup>。铁氧体电感试样尺寸小, 表面的微小裂纹开口宽度仅为 1  $\mu\text{m}$  左右, 在压制过程中表面还会形成不规则状干扰纹理。对其表面的微小裂纹检测一般对激励和观测有较高的要求, 同时要求裂纹成像具有较高的信噪比<sup>[2-3]</sup>。缺陷检测的方法主要有人工视觉法、听

音法、渗透法、机器视觉法<sup>[4]</sup>和激光热成像法, 其中前三者都需要依赖人工判断, 检测速度慢。而传统的机器视觉检测裂纹方法, 会存在裂纹成像信噪比不高、准确率低的问题。综上本文采用的激光热成像法, 对裂纹检测的灵敏度较高, 激光能量密度和位置可精确的控制, 可对 1  $\mu\text{m}$  宽<sup>[5]</sup>、10  $\mu\text{m}$  深<sup>[6]</sup>的裂纹形状清晰直观的成像。

铁氧体电感质检分选的前提是能从批量电感的热成像中分割出单个电感图像进行分析。因此, 电感图像分割方法研究具有重要的现实意义。常用的目标

收稿日期: 2020-01-10; 修订日期: 2020-02-08.

作者简介: 张亦舒 (1993-), 女, 浙江温州人, 硕士研究生, 研究方向为无损检测, 图像处理。E-mail: 441808192@163.com.

通信作者: 叶树亮 (1973-), 男, 安徽黄山人, 教授, 博士, 主要研究领域化工产品安全测试技术与仪器, 工业零部件缺陷检测技术与设备, 精密测量中部件信号处理与误差分析技术。E-mail: itmt\_paper@126.com.

基金项目: 浙江省自然科学基金 (LY18F030011)。

分割方法有阈值分割<sup>[7]</sup>、边缘检测和区域生长<sup>[8]</sup>、基于分水岭变换的分割方法<sup>[9-11]</sup>、基于凹点检测与曲线拟合的分割方法<sup>[12]</sup>。但是由于电感检测中样品是无序摆放，粘连电感之间无明显的分界线，使其图像难以有效分割；且电感不规则轮廓、表面边缘处裂纹和因激光激励不均匀导致的背景干扰，都会对分割带来难度。以上方法在电感分割运用上存在欠分割、过度分割或检测效率低等问题。综上，笔者对分割算法进行改进，在消除背景干扰的同时克服分水岭算法的不足，利用距离变换结合分水岭算法提取单个电感，并对该方法进行了实验。

文中针对精确分割批量粘连铁氧体电感试样，提出了一种基于分水岭算法的电感激光热成像图像分割方法。激光扫描后求取梯度得到铁氧体试样热成像图，再通过滤波操作和距离变换结合分水岭算法得到电感分割图。对分割结果进行评价，验证系统的实用性，为电感后续分选工作提供技术支持。

## 1 激光扫描热成像检测

### 1.1 激光扫描检测系统

利用试样轮廓、裂纹阻碍热流导致待检试样表面温度分布不均匀，从而在激光扫描过程中轮廓处或者裂纹附近温升变化异常。当激光扫描路径平行于裂纹扫描时，裂纹无法阻碍扫描方向上热流的传递，使得样品表面各点温升速率无明显差别。

本文采用两个激光器扫描路径相互垂直的激光扫描方式，可保证各个方向上所有裂纹都可以清晰成像，提高成像信噪比，利于后期裂纹分割。其中，线激光扫描热成像检测铁氧体电感的系统结构如图1所示。

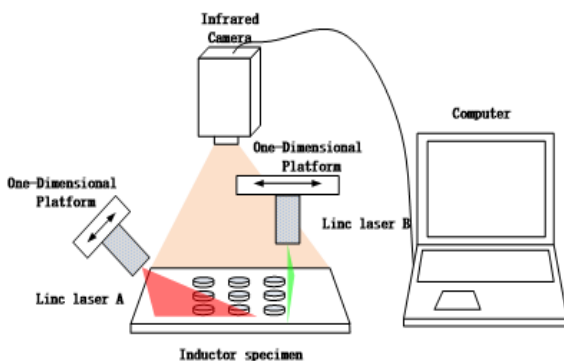


图1 激光扫描热成像系统

Fig.1 Laser scanning thermal imaging system

两个激光器中线激光方向与待检测铁氧体电感呈一定夹角，两个激光器扫描方向互相正交。激光从试样的一侧开始激励时，试样轮廓及表面裂纹阻碍热流流动，导致检试样表面温度分布不均匀，从而使温

升在激光扫描过程中试样轮廓或裂纹附近变化异常。热像仪同步记录试样表面的温度变化情况并成像，对热成像图求取最大温度梯度可得到电感温度梯度图，后续可对电感试样进行分割等后续表面特征分析。

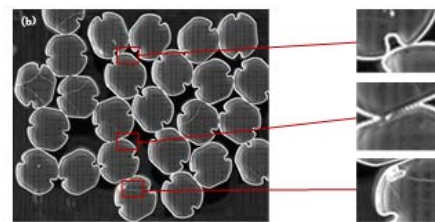
### 1.2 电感最高温度梯度热成像

两个线激光在正交方向上依次正交扫描后，求取沿2个扫描方向上各点的最高温度梯度值  $gradT_x$  和  $gradT_y$ ，并将这两个值平方后相加求取平均后作为该点的新值进行成像。如图2所示，为铁氧体电感实物图和经过激光激励后求取最高温梯度的铁氧体电感温度梯度图。可以看出，最高温度梯度图中电感轮廓清晰可见，在分割出单个电感后可以对其表面进行下一步的特征分析，达到分选的目的。



(a) 电感实物图

(a) Physical diagram of inductor



(b) 电感温度梯度和局部粘连、干扰处细节图

(b) Detailed diagram of temperature gradient of inductor, local adhesion and interference

图2 铁氧体电感图像

Fig.2 Ferrite inductance image

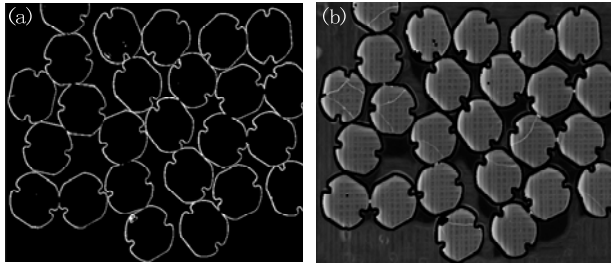
## 2 电感图像分割算法

### 2.1 形态学处理

但是由于试样互相粘连、轮廓不规则（存在倒角）且其表面存在裂纹和激光激励不均匀，如图2(b)所示，这些干扰都会影响电感的正确分割。因此，我们要对热成像图进一步处理，为后续的分水岭算法分割试样提供便利。

利用距离变换和分水岭算法对电感分割需要先得到电感的二值图。为了消除电感试样周围的背景噪声以及表面上的裂纹和不均匀，更好地获取电感的二值图，本文先采用次大值滤波和边缘提取算法将部分粘连处面积较小的电感分割。

如图 3 所示,先采用次大值滤波消除温度梯度图的激励非均匀性,再利用边缘提取算法从电感温度梯度图  $I_1$  (图 2(b)) 中提取电感轮廓  $\Omega_1$  (图 3(a)),此时粘连的部分电感之间轮廓仍然存在相连的情况。膨胀  $\Omega_1$  并同  $I_1$  相减即可得到去除试样轮廓的  $I_2$ ,如图 3(b)所示。观察  $I_2$  可以看出,可断开由于激励非均匀性、裂纹处干扰以及点接触粘连的电感,但是仍存在轮廓边缘部分粘连的样品依旧无法断开的情况。



(a) 电感轮廓图 (b) 消除轮廓图

(a) Inductor profile image (b) Eliminate contour image

图 3 消除试样轮廓过程图

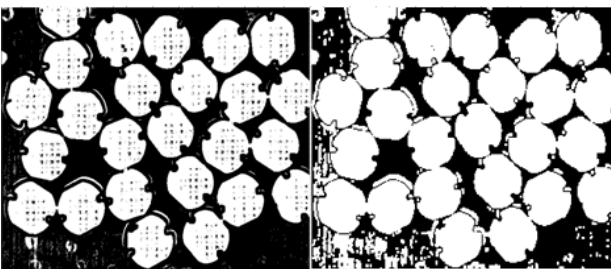
Fig.3 Elimination of sample profile process

获取  $I_2$  二值化后的最高温度梯度二值图  $IB_1$  (图 4(a)),由于激光激励的非均匀性,二值化的电感表面存在孔洞,电感周围背景处也有干扰,利用形态学中填充孔洞操作得到  $IB_1F$  (图 4(b)),去除小面积连通区域即可得到消除小面积干扰的二值图  $IB_2$  (图 4(c)),此时部分粘连试样仍未分割开。对消除小面积的二值图  $IB_2$  进行腐蚀操作得到试样腐蚀二值图  $IB_2I$  (图 4(d))。

经过上述操作后,所有试样所在连通区域均不互相粘连,后续可进行距离变换和分水岭分割。

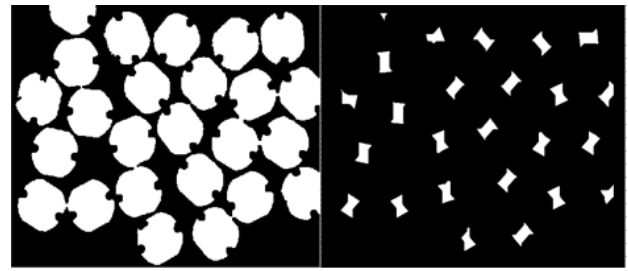
### 2.2 距离变换结合分水岭分割电感

将试样腐蚀二值图  $IB_2I$  经过距离变换后,通过分水岭算法(从一个初始的高域值逐渐降低)可以接着把距离图像分割为单个成员构成的物体。将分割之后得到的分水岭脊线同试样腐蚀二值图  $IB_2I$  进行逻辑操作之后即可获得获得的各个连通区域即为分割得到的



(a) 最高温度梯度二值图 (b) 填充孔洞图

(a) Maximum temperature gradient binary diagram (b) Filling hole diagram



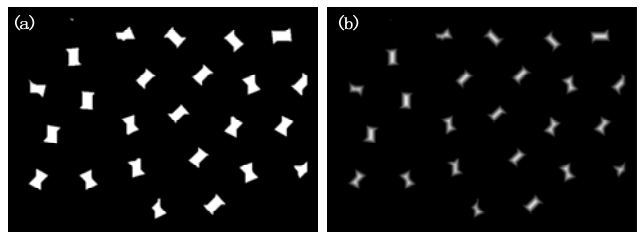
(c) 去除干扰的试样二值图 (d) 腐蚀二值图  
(c) Binary diagram of sample for interference removal (d) Corrosion binary diagram

图 4 形态学处理过程图

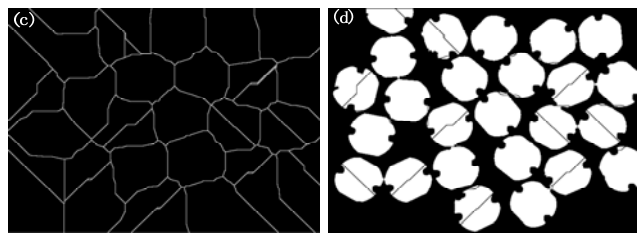
Fig.4 Morphological processing chart

各个试样掩膜,将掩膜同试样温度梯度图点乘则可得单个铁氧体电感试样的温度梯度图,后续可进行电感分选操作。

如图 5 所示,由于腐蚀操作和试样本身形状不规则导致腐蚀结果为不规则沙漏型,使得距离变化后分水岭算法中,沙漏图形中间出现分水岭脊线,导致分割样品时存在过分割的现象。



(a) 腐蚀二值图 (b) 距离变换  
(a) Corrosion binary graph (b) Distance transformation



(c) 距离变换的负分水岭脊线 (d) 叠加黑色分水岭脊线的试样图像  
(c) Negative watershed ridge of distance transformation (d) Sample image superimposed with black watershed ridge

图 5 原始图像距离变换和分水岭分割

Fig.5 Distance transformation and watershed segmentation of original image

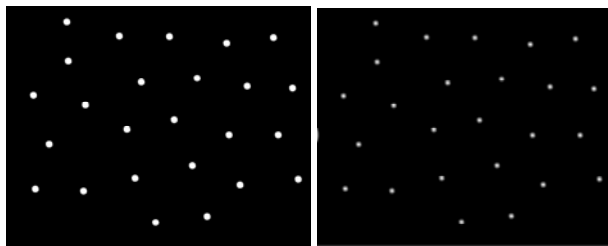
## 3 实验及结果

### 3.1 实验条件

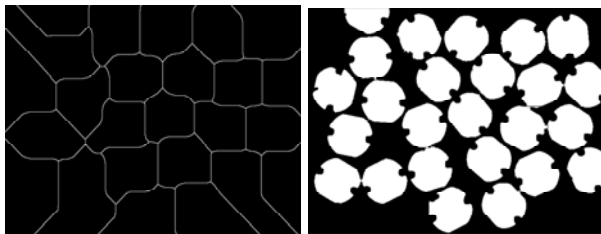
实验样品包含直径为 4 mm 的不规则圆形铁氧体电感,其部分试样表面会存在宽度为 1~70  $\mu\text{m}$  级别的裂纹。



由于在距离变换图像上运用分水岭算法，可以有效地把接触在一起的圆形物体分开。根据上述原因，本文为了避免出现过分割的现象，在得到试样腐蚀二值图 IB2I 后，将各个连通区域转换成尺寸大小一致的圆形区域（每个连通区域变换前后中心坐标保持不变），再进行后续分水岭分割操作，各个操作结果如图 6 所示，此方法可以有效避免过分割的现象。



(a) 腐蚀二值图 (b) 距离变换  
(a) Corrosion binary graph (b) Distance transformation



(c) 距离变换的负分水岭脊线 (d) 叠加黑色分水岭脊线的试样图像  
(c) Negative watershed ridge of distance transformation (d) Sample image superimposed with black watershed ridge

图 6 形状变换后的距离变换和分水岭分割

Fig.6 Distance transformation and watershed segmentation after shape transformation

电感分割实验装置如图 7 所示。本系统采用试样静止、两个线激光器依次扫描样品的模式，通过热像仪记录试样表面温度变化并成像。其中线激光功率采用 30 W，运动速度控制在 10 mm/s 左右，使得电感试样表面的最高温升在 80℃ 以下。采用镜头分辨率为 50 μm 的 Flir A655SC 热像仪对试样表面的温度变化情况进行记录。该装置可在 18 mm×24 mm 的视场范围下，在 5 s 内一次批量检测至少 25 个不规则圆形铁氧体电感样品。

### 3.2 实验结果与讨论

为了验证上述算法的分割性能，对 3 组电感进行了分割实验，其中电感的分割结果如图 8 所示。图 8(a) 为激光激励后试样的最高温度梯度图，图 8(b) 为分水岭分割图像后，采用外接矩形对各个试样区域进行编号标记的结果。

此时可以看出原始试样温度梯度图中的试样粘连部分叠加分水岭脊线已经被有效分割开来，后续可

提取单个电感试样，并对其表面特征进行下一步分析。

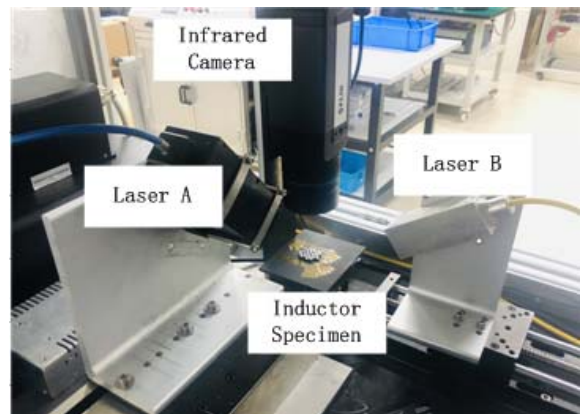
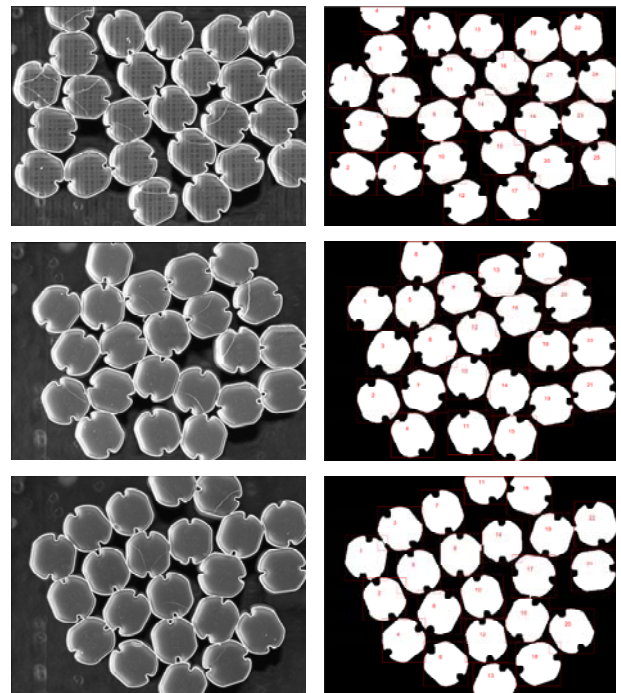


图 7 电感分割实验装置图

Fig.7 Diagram of experimental device for inductor division



(a) 最高温度梯度图 (b) 分割结果标记  
(a) Maximum temperature gradient (b) Segmentation result marker image

图 8 电感分割结果示意图

Fig.8 Schematic diagram of inductor segmentation results

## 4 结束语

本文搭建了一套基于线激光扫描热成像检测铁氧体电感的系统，实现对铁氧体电感表面特征成像；再采用形态学操作断开大部分试样粘连处并去除干扰噪声；最后利用距离变换结合分水岭算法分割单个电感试样。

实验结果表明,本文算法可有效克服分水岭算法中的过分割,对粘连严重,试样存在轮廓不规则(存在倒角)、且其表面存在裂纹和激光激励不均匀的铁氧体电感温度梯度图像的分割具有较高的准确性。在分割过程中同时提取电感表面区域,另可保留试样轮廓,为后续的电感分选操作打下良好基础,进而间接辅助对电感表面的特征分析。

本文对铁氧体电感温度梯度图像分割具有一定的适应性,但是这仅针对圆形试样,对于其他可能形状的试样(例如方形等)未进行尝试,后续可作为下一步研究的方向。

### 参考文献:

- [1] 闫会朋, 杨正伟, 田干, 等. 基于涡流热成像的铁磁材料近表面微裂纹检测[J]. *红外与激光工程*, 2017, **46**(3): 231-236.  
YAN Huipeng, YANG Zhengwei, TIAN Gan, et al. Micro crack detection near surface of ferromagnetic materials based on eddy current thermography[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, **46**(3): 231-236.
- [2] 王晓宁, 侯德鑫, 叶树亮. 基于激光热成像的铁氧体裂纹检测[J]. *激光与红外*, 2015, **45**(11): 1298-1303.  
WANG Xiaoning, HOU Dexin, YE Shuliang. Crack detection of ferrite based on laser spot thermography[J]. *Laser & Infrared*, 2015, **45**(11): 1298-1303.
- [3] 王晓娜, 姚行洲, 侯德鑫, 等. 圆柱铁氧体微裂纹的激光扫描热成像检测[J]. *红外与激光工程*, 2018, **47**(11): 51.  
WANG Xiaona, YAO Xingzhou, HOU Dexin, et al. Detection of microcrack in cylinder ferrite components based on scanning laser thermography[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, **47**(11): 51.
- [4] 苑玮琦, 薛丹. 基于机器视觉的隧道衬砌裂缝检测算法综述[J]. *仪器仪表学报*, 2017(12): 3100-3111.  
YUAN Weiqi, XUE Dan. Review of tunnel lining crack detection algorithm based on machine vision[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017(12): 3100-3111.
- [5] Burrows S E, Dixon S, Pickering S G, et al. Thermographic detection of surface breaking defects using a scanning laser source[J]. *NDT & E International*, 2011, **44**(7): 589-596.
- [6] Schilichting J, Ziegler M, Maierhofer C, et al. Flying laser spot thermography for the fast detection of surface breaking cracks[C]//18th World Conference on Nondestructive Testing, Durban, 2012: 16-20.
- [7] 徐佳. 现代医学细胞显微图像分割改进算法[J]. *计算机与现代化*, 2014(2): 95-98, 101.  
XU Jia. Improved algorithm for cell microscopic image segmentation[J]. *Computer and Modernization*, 2014(2): 95-98, 101.
- [8] 漆鹏杰, 刘秀波, 仲兆准, 等. 显微细胞图像有形成分自动识别[J]. *计算机系统应用*, 2015, **24**(5): 11-18.  
QI Pengjie, LIU Xiubo, ZHONG Zhaohuai, et al. Visible components automatic recognition of microscopic cell image[J]. *Computer Systems & Applications*, 2015, **24**(5): 11-18.
- [9] 张海涛, 李雅男. 阈值标记的分水岭彩色图像分割[J]. *中国图象图形学报*, 2019, **20**(12): 1602-1611.  
ZHANG Haitao, LI Yanan. Watershed algorithm with threshold mark for color image segmentation[J]. *Journal of Image and Graphics*, 2019, **20**(12): 1602-1611.
- [10] 杨小青, 杨秋翔, 杨剑. 基于形态学的显微细胞图像处理与应用[J]. *计算机系统应用*, 2016, **25**(3): 222-226.  
YANG Xiaoqing, YANG Qiuxiang, YANG Jian. Microscopic cell image processing and application based on morphology[J]. *Computer Systems & Applications*, 2016, **25**(3): 222-226.
- [11] 王鑫, 胡洋洋, 杨慧中. 基于迭代腐蚀的粘连细胞图像分割研究[J]. *南京理工大学学报: 自然科学版*, 2016, **40**(3): 285-289.  
WANG Xin, HU Yangyang, YANG Huizhong. Segmentation of adherent cell image based on iterative erosion[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2016, **40**(3): 285-289.
- [12] LIAO M, ZHAO Y Q, LI X H, et al. Automatic segmentation for cell images based on bottleneck detection and ellipse fitting[J]. *Neurocomputing*, 2015, **173**(P3): 615-622.